

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Sveučilišni preddiplomski studij računarstva

PRAKTIČNA PRIMJENA AKTIVNE INFRACRvene
TERMOGRAFIJE

Završni rad

Filip Franić

Osijek, 2019.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POVIJESNI RAZVOJ PODRUČJA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE	2
3. DEFINICIJA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE	5
3.1. Podjela infracrvene termografije	7
3.2. Aktivna termografija	8
4. TEORIJSKA ANALIZA INFRACRVENOG ZRAČENJA	12
4.1. Zračenje crnog tijela	14
4.2. Svojstva materijala i karakteristična emisivnost	16
5. PRIMJENA AKTIVNE INFRACRVENE TERMOGRAFIJE	19
5.1. Primjena u analizi elektroničkih sklopova	19
5.2. Fotonaponski modul i ćelije	22
5.3. Primjena u medicini	23
5.4. Zrakoplovna i svemirska industrija	27
5.5. Automobilska industrija	30
6. INFRACRVENA TERMALNA KAMERA	32
6.1. Osnovne karakteristike termalnih kamera	33
6.2. Praktična provedba infracrvene termografske analize dijela unutrašnjeg zida zgrade	35
LITERATURA	39
SAŽETAK	41
ABSTRACT	42
ŽIVOTOPIS	43

1. UVOD

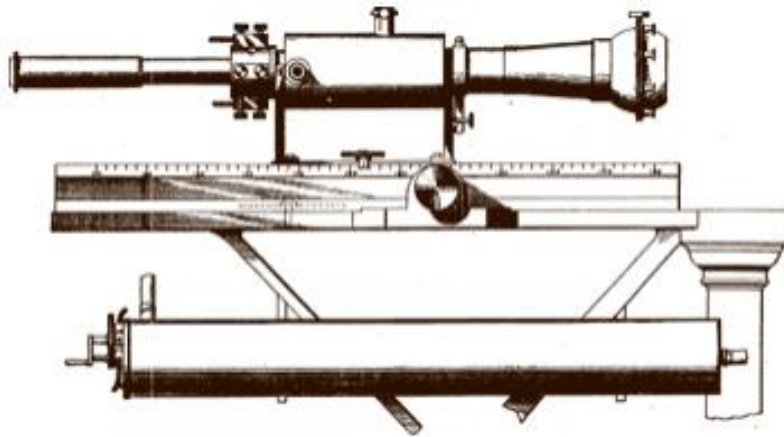
Infracrvena termografija predstavlja sofisticirani alat za mjerenje temperature i njezine raspodjele na površini tijela te analizu dobivenih slika, takozvanih termograma. Fizikalna pozadina, objašnjena je početkom 20.st, a tehnološki razvoj se kontinuirano razvija i napreduje. IC termografija je beskontaktna metoda mjerenja koja se vrši u stvarnom vremenu koja omogućuje relativno brzo skeniranje stacionarnih objekata, ali i objekata u pokretu. Ljudsko oko može registrirati samo 36% valnih dužina koje emitira Sunce [1]. Ostatak spektra koji većinom čini infracrveno zračenje nije vidljiv bez upotrebe termografske kamere. Velika primjena ove metode je u kontroli i održavanju, otkrivanju požara, ocjeni kvalitete izolacije, zgradarstvu, medicini, zrakoplovstvu, vojnoj industriji, detekcija kvarova na kompozitnim materijalima i dr. [2]. U ovome radu ćemo se osvrnuti na aktivnu vrstu infracrvene termografije kojom testiramo objekte uz određenu pobudu, najčešće u obliku toplinskih valova. U drugome poglavlju govorimo o povijesti infracrvene termografije, njezinom nastanku i razvoju kroz godine. Kroz treće poglavlje su objašnjene osnove termografije, što je ona i na kojem principu radi. Vrste termografije, razlike kvalitativne i kvantitativne te aktivna i pasivna termografija dane su u istom poglavlju. U četvrtome poglavlju su opisani pojmovi zračenja crnog tijela, zakonitosti koje imaju značaj u IC termografiji te karakteristike emisivnosti. U sljedećem, glavnom poglavlju se govori o primjeni termografije u stvarnome svijetu i različitim industrijama. U šestom poglavlju su objašnjene IC kamere koje se koriste u današnjici te je proved praktični dio rada. U zadnjem poglavlju je dan zaključak teme.

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak rada je objasniti osnove aktivne termografske tehnike, napraviti pregled literature iz područja i provesti praktično snimanje.

2. POVIJESNI RAZVOJ PODRUČJA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE

Početak razvoja infracrvene termografije započinje 1800. godine kada Sir William Herschel (1738-1822) otkriva postojanje infracrvenog zračenja izvan spektra vidljive svjetlosti. Eksperiment je započeo ponavljajući Newtonov eksperiment s prizmom, ali tražeći učinak zagrijavanja, a ne vizualnu raspodjelu intenziteta u spektru svjetlosti. Uz pomoć termometra postavljenog iznad crvenog dijela spektra svjetlosti stvorene iz prizme, Herschel je demonstrirao prisutnost nevidljive radijacije čija energija je otkrivena zbog svog efekta zagrijavanja. To je djelovanje pripisao utjecaju zračenja nevidljivog za oko, kojemu je priroda i svojstva jednaka svjetlosti, i nazvao ga infracrveno zračenje. Od tog trenutka započinje znanstveno istraživanje područja infracrvene termografije. Ipak, trebalo je vremena da se razviju različiti detektori za ovu vrstu zračenja. 1830. godine prvi takav detektor je razvijen na principu termočlanka, nazvan pirometrom [3]. Bolometar, koji je nastao 1878. godine kojeg je izumio Samuel Pierpont Langley (1834-1906), bio je korišten za proučavanje sunčevog zračenja. Bolometri se zasnivaju na mjerenju promjene neke električne veličine koja nastaje zbog promjene temperature električnog osjetljivog elementa. Bolometar je značajno poboljšao osjetljivost detekcije infracrvenog zračenja.



Sl.2.1. *Langeov bolometar iz 1878.godine [3]*

Veliki iskorak u tumačenju veze između temperature tijela i energije koju ono zrači dali su Jožef Stefan (1835-1893) i Ludwig Boltzmann (1844-1906). Obadvojica su zaslužna za dokazivanje da je energija zračenja površine tijela razmjerna četvrtoj potenciji njegove apsolutne temperature, pa je ta zakonitost i poznata kao Stefan-Boltzmannov zakon. Nadalje, 1900.godine

Max Plank formulira svoj zakon o zračenju gdje objašnjava spektralno-energetsku distribuciju zračenja koje emitira crno tijelo (hipotetsko tijelo koje potpuno apsorbira svu energiju zračenja koja pada na nju, dostiže određenu temperaturu, a zatim ponovno vraća tu energiju istom brzinom kojom je i upija). Ključna točka Planckove teorije je pretpostavka kvantiziranih energetskih stanja. Ovaj razvoj koji predstavlja odstupanje od klasične fizike označio je rođenje kvantne teorije. Zračenje crnog tijela bio je prvi fenomen koji se objasnio kvantnim modelom. U drugom dijelu 19. stoljeća, uz poznate podatke o toplinskom zračenju, pokusi su pokazali da svjetlost koja pada na određene metalne površine uzrokuje emitiranje elektrona s tih površina. Ovaj fenomen poznat je kao fotoelektrični efekt, a emitirani elektroni nazivaju se fotoelektroni [3].



Sl.2.2. *Provedba termografske analize iz 1969. godine [3]*

Daljni tehnološki razvoj se odvijao između 1870. i 1920. godine koji je imao utjecaj na razvoj prvog kvantnog detektora baziran na radu između zračenja i materije. Proces detekcije više nije bio nastanak električnog signala zbog efekta zagrijavanja zračenja, već kao direktan prijelaz zračenja u električni signal. Kroz nadolazeće godine se nastavio razvoj detektora. Kroz period od 1930. do 1944. godine dolazi do razvoja detektora od olovnog sulfida (PbS), koji su korišteni u vojne svrhe te imaju osjetljivost od 1,3 do 3 μm . Nadalje od 1940. do 1950. godine dolazi do napretka u proširenju spektralnog područja, 3 do 5 μm , upotrebom indij antimonida (InSb). 1960-tih godina poznata su istraživanja dalekog infracrvenog zračenja, od 8 do 14 μm , pomoću živatelurij-kadmij detektora (HgTeCd). Ovi detektori zahtijevaju određeno hlađenje zbog njihove veće

osjetljivosti. Također su doprinijeli razvoju sustava za izradu termičkih slika ili termograma, koji zavise o detekciji infracrvenog zračenja u širini od 2 do 15 μm [3].



Sl.2.3. *Različiti infracrveni detektori (s lijeve strane: InSb, InAsSb, InGaAs)*[5]

Krajem 1950-ih pa nadalje, tvrtke Texas Instruments, Hughes Aircraft i Honeywell, razvijale su detektore korištene za stvaranje termografskih slika. Ipak, uporaba infracrvene termografije korištena je u većini za vojne svrhe. 1992. godine, The American Society of Non-Destructive Testing razvio je i odobrio standarde za podučavanje toplinskog snimanja koji se sastoji od tri stupnja kvalificiranosti. Daljnji razvoj infracrvenih (IC) kamera doprinio je smanjenju veličine kamera, ali i cijene su padale pa su se počele pojavljivati upotrebe u različitim industrijama. Početkom 21. stoljeća izrada termičkih slika pomoću IC kamera od strane kućnih inspektora postala je sve češća. Danas, postoji više vrsta i metoda infracrvene termografije, s različitim pristupima i namjenama te velikom raznolikošću IC detektora i kamera [6].

3. DEFINICIJA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE

Svako tijelo na temperaturi iznad apsolutne nule emitira elektromagnetske valove (IC zračenje). Baš to svojstvo omogućuje mjerenje intenziteta infracrvenog zračenja s površine promatranog tijela. Infracrvena termografija je grana znanosti koja se bavi otkrivanjem, registracijom, obradom i vizualizacijom nevidljivog infracrvenog zračenja koje emitira neki objekt, uključujući i čovjeka [2]. Termografija nije jedini način mjerenja raspodjele temperature na površini, ali možemo slobodno reći da je možda najelegantniji. Može se prakticirati na grubim površinama te dati sliku uzorka s određene udaljenosti ne dodirujući površinu. Zbog toga spada pod beskontaktnu, nerazornu metodu koja svoju svrhu pronalazi u brojnim djelatnostima i različitim područjima. Ima veliku primjenu u industriji, medicini, astronomiji, građevinarstvu i ostalim znanstvenim djelatnostima. Također, ova tehnologija se koristi kod ispitivanja kvalitete izolacije objekata, utvrđivanje mjesta s povećanom vlagom, pronalazak osoba u objektu zahvaćenim požarom, pronalazak osoba izgubljenih u divljini i dr.



Sl.3.1. *Primjer termograma zgrade*

Infracrveno zračenje emitirano od tijela prenosi specifične informacije o materijalu, njegovoj nedavnoj prošlosti i karakteristikama. Infracrveno zračenje, koje je nevidljivo ljudskom oku, postoji od 780 nm do 1 mm u elektromagnetskom spektru [7]. Zato tu informaciju možemo dohvatiti i obraditi s prikladnom tehnologijom i sustavom te na kraju imati cjelokupni prikaz objekta. U ovome postupku se koriste infracrvene termalne kamere koje detektiraju zračenje te ga

koriste za izradu toplinske slike ili termograma. Na slici (Sl.3.1) je prikazan termogram zgrade s temperaturama određenih pozicija postavljenih na infracrvenoj kameri. Temperatura na poziciji 3 očitava najnižu moguću temperaturu s obzirom na to da je njezin pravac usmjeren prema svemiru



Sl.3.2. *Primjer termografskog zapisa osobe i odraza u staklu*



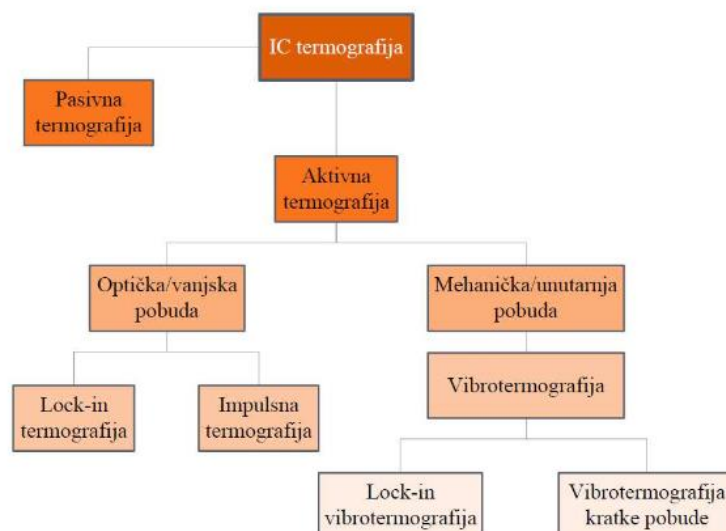
Sl.3.3. *Termogram u iron paleti radi lakšeg uočavanja pojedinih detalja zapisa*

Primjenom različitih kodova boja koristeći dugine boje (eng. Rainbow colors) te podešavanju nivoa i raspona temperature, moguće je na termogramu izolirati temperaturnu anomaliju ili mjesta žarišta temperature. Izoliranjem temperaturne anomalije, odnosno oštećenja može se odrediti žarište anomalije te na taj način točno odrediti mjesto na kojem je potrebno izvršiti popravak oštećenja.

3.1. Podjela infracrvene termografije

Rezultat termografskog snimanja može se koristiti kvalitativno ili kvantitativno. Kvalitativna termografija daje ograničen broj informacija u kratkom vremenu, dok se kvalitativnom termografijom dobivaju točni podaci o temperaturi, ali je za to obično potrebno preračunati podatke dobivene na termogramu. Kvalitativno korištenje termografije daje samo okvirne informacije o promatranom objektu u pogledu raspodjele temperature po njegovoj površini. Na termogramu se lako uočavaju područja promatrane površine s neuobičajenom temperaturom, pa se na temelju toga mogu donositi zaključci o potrebnim intervencijama. Podaci procijenjeni bez poznavanja svojstava promatrane površine mogu dati pogrešne podatke, pa i zavarati korisnika. Zbog točnih podataka temperature na termogramu koje kvantitativna termografija omogućuje potrebno je poznavati emisijska svojstva promatranog objekta, stanje atmosfere između objekta i kamere te stanje okoline. Na kraju, potrebno je podatke s termograma pomoću tih informacije preračunati u ispravne vrijednosti [8].

Dvije osnovne konfiguracije za provedbu infracrvene termografije istraživanja su pasivni i aktivni pristup. Snima li se neki objekt u ustaljenom (stacionarnom) temperaturnom stanju kakvo je postignuto duljim boravljenjem tog objekta u okolini čija se temperatura ne mijenja, kažemo da je riječ o pasivnoj termografiji. Ako je zračenje emitirano s površine objekta različito od zračenja koje emitira njegova okolina, on će na termogramu biti vidljiv [9]. U pasivnoj termografiji, nadzor nad infracrvenom zračenju, koju emitira objekt nad kojim se izvršava test, korišten je kao standardna tehnika kontrole kvalitete različitih struktura.



3.2. Aktivna termografija

Aktivna termografija razvija se kroz generiranje toplinskog toka prema objektu, tako da termofizička svojstva testiranog objekta mogu pojačavati ili sprječavati taj protok topline, ovisno o termičkim svojstvima materijala. Takvo generiranje topline najčešće proizvode različite lampe. Pokazalo se da postupak aktivnog zagrijavanja pruža više potencijala od konvencionalnog pasivnog pristupa [10]. Aktivna termografija omogućuje bolji kontrast za pregled, manje je osjetljiva na uvjete okoliša i ima veću prostornu razlučivost od pasivne termografije. Najznačajniji primjeri aktivne ili dinamične termografije su:

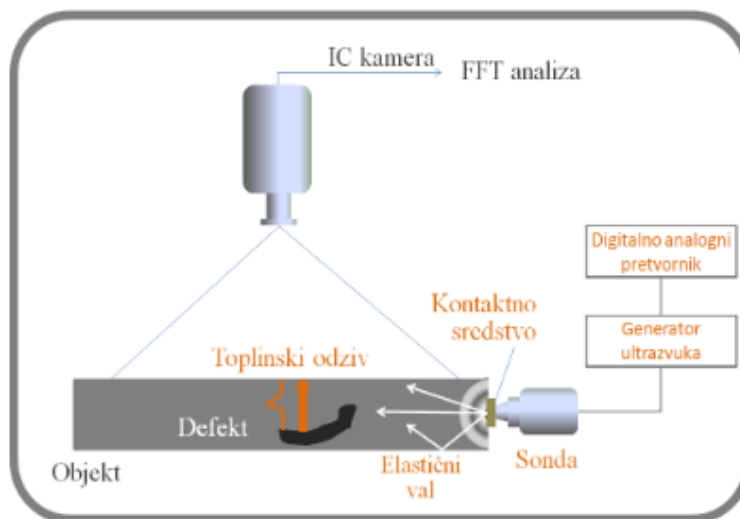
- Termografija koračnog grijanja (SH) eng. Step-Heating Thermography
- Vibrotermografija (VT) eng. Vibrothermography
- Impulsna termografija (PT) eng. Pulsed Thermography
- Lock-in termografija (LT) eng. Lock-in Thermography
- Termografija faznog impulsa (PPT) eng. Pulsed Phase Thermography

Pasivna termografija je u većini slučajeva kvalitativna, dok se aktivna primjenjuje u kvantitativne svrhe, najčešće u laboratorijskim uvjetima pri istraživačkim i razvojnim disciplinama. Svima njima zajednički je cilj poslati određenu toplinsku energiju u promatrani objekt i promatrati njegov odziv na tu toplinsku pobudu. Naknadnom analizom se dobivaju rezultati o strukturi materijala ispod površine, kao i moguća oštećenja i pukotine [10]. Ovakvi aktivni sustavi koriste još i generator signala koji stvara signal ovisno o vrsti termografije.



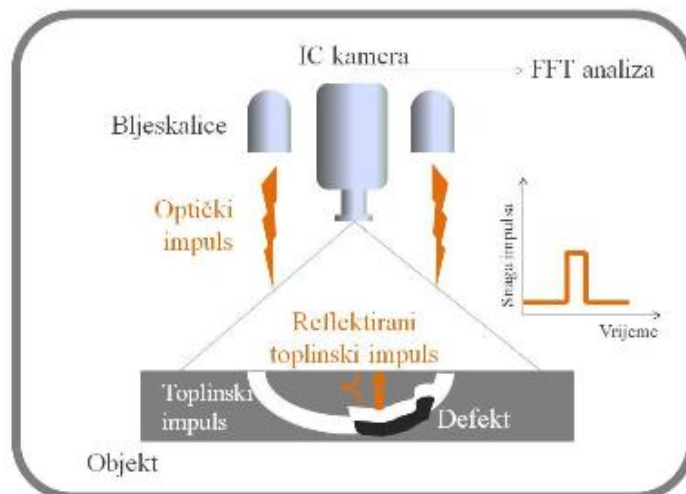
Sl.3.2.1. Eksperiment aktivne termografije [11]

Vibrotermografija je tehnika aktivne termografije kod koje se koristi efekt oslobađanja topline uslijed trenja uzrokovanog mehaničkim vibracijama (0-25 kHz) induciranim na površini promatranog objekta. Ultrazvučni valovi putuju kroz homogeni materijal, dok se toplina oslobađa na mjestu postojanja oštećenja kao što su pukotine. Periodični valovi uzrokuju povećanje temperature na mjestima koncentracije naprezanja (Sl.3.2.2). Ova metoda još se naziva i ultrazvučna ili sonična termografija. Postoje dvije konfiguracije ove metoda. Prva konfiguracije je vibrotermografija kratke pobude (eng. Burst vibrothermography), a druga je lock-in vibrotermografija. Kod oba navedena pristupa moguće je mijenjati (modulirati) amplitudu i frekvenciju kako bi se pokrio spektar frekvencija ultrazvuka za pojedinu primjenu [9].



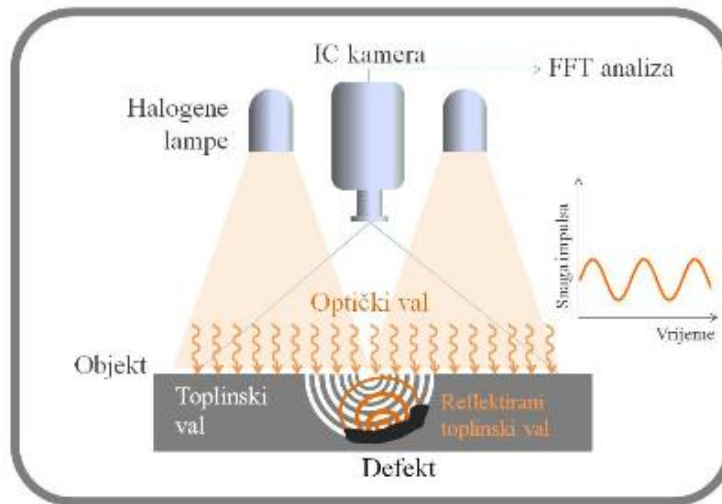
Sl.3.2.2. Shematski prikaz vibrotermografije [9]

Impulsna termografija je vrsta dinamične termografije koja za eksperimentalni test koristi toplinski izvor, koji se najčešće sastoji od više lampi (eng. Flash lamps) koje osiguravaju trenutno zagrijavanje ciljanog objekta. Za praćenje temperature na površini objekta koriste se infracrvene kamere postavljene na fiksno vremensko razdoblje ili period nakon slanja toplinskog impulsa [12]. Kako bi se dobila bolja termografska slika po dubini, lampe se postavljaju na određene udaljenosti od par milimetara do nekoliko metara. Budući da toplinskom impulsu tj. valu treba neko vrijeme da prođe do određene dubine materijala, vrijeme snimanja nakon poslanog vala daje informaciju o razini dubine. Prednost impulsne termografije je dobivanje informacija o različitim dubinama koje se dobivaju iz niza termograma uzeti netom poslije slanja jediničnog impulsa. Ipak, impulsna termografija nije prikladna za mjerenje vrlo slabih temperaturnih signala.



Sl.3.2.3. Shematski prikaz impulsne termografije [9]

Lock-in termografija koristi slične elemente i opremu za eksperimentiranje nad objektima kao i impulsna termografija. Razlika je što generator signala šalje oscilirajuće toplinske valove sinusoidnog oblika, umjesto jediničnih impulsa. Ovdje se slanje topline događa periodično sa stalnom frekvencijom (eng. lock-in frequency) [12]. Sinusoidni oblik šalje intenzitet koji odgovara njegovom obliku (od najviše do najniže amplitude), što zapravo predstavlja poslanu toplinu koja ulazi i vraća se iz objekta snimanog infracrvenom kamerom. Kada ulazni val proдре površinu materijala, apsorbira se i fazno je pomaknut. Kada ulazni val dosegne područja unutar objekta, koji ima određene defekte u strukturi, on se djelomično reflektira. Taj reflektirani val interferira s dolaznim ili ulaznim valom što stvara drugačiji uzorak površinske temperature. Na kraju, unutarnju strukturu objekta koja je pod eksperimentom može se utvrditi procjenom faznog pomaka površinskih temperatura u odnosu na ulazni val. Što je niža frekvencija ulaznog vala, dobivamo više informacija o razinama dubina materijala ili objekta. Također moramo uzeti u obzir korištenje optimalne frekvencije ovisno o termofizičkim karakteristikama objekta, kao i njegovoj debljini .



Sl.3.2.4. Shematski prikaz Lock-in termografije [9]

Prednost ovakve termografije je veća osjetljivost, mogućnost bolje izrade termograma materijala sa složenijom strukturom. Za razliku od impulsne termografije, lock-in metoda zahtjeva znatno veće vrijeme mjerenja, gdje ih je potrebno izvršiti nekoliko kako bi se dobile informacije o dubinama.

4. TEORIJSKA ANALIZA INFRACRVENOG ZRAČENJA

Pierre Prevost je 1791. godine dokazao da sva tijela neprekidno zrače toplinu neovisno o njihovoj temperaturi. Kasnije je ovaj zakon proširen na definiciju da svako tijelo koje ima temperaturu višu od 0 K, emitira elektromagnetsko zračenje u cjelokupnom spektru valnih duljina [9]. Materija konstantno emitira i apsorbira elektromagnetsko zračenje. Temeljni zakon teorije elektromagnetizma pokazuje da se električno polje E , zbog kretanja naboja q , malo razlikuje od statičkog polja

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (4-1)$$

gdje je r udaljenost na kojoj se vrše opažanja velika u usporedbi s pomicanjem naboja i ϵ_0 je permitivnost ili dielektričnost vakuumu. S druge strane, ako se električni naboj ubrzava, Maxwellova jednadžba

$$\text{rot } H = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4-2)$$

pokazuje da se energija oslobađa u obliku radijacije ili zračenja. Energija oslobođena u obliku radijacije je

$$W = \frac{hc}{\lambda} \quad (4-3)$$

gdje λ predstavlja valnu duljinu, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J je Planckova konstanta i $c = 3 \cdot 10^8$ ms⁻¹ je brzina svjetlosti.

Apsorpcija zračenja materijom je manje ili više selektivna, što znači da ovisi o valnoj duljini i vrsti materijala. Spektar zračenja je podijeljen na više regija koje odgovaraju određenom rasponu rada izvora i detektora [3]. Važno je napomenuti da valna duljina emitirane radijacije je obrnuto proporcionalna energiji. Što je veća valna duljina, energija opada (Sl.4.2). Infracrveni spektar emitiraju tijela na normalnim temperaturama (temperature zemljine površine), točnije snažno emitiraju na takvim temperaturama. Tijelo se neće prikazati kao crno u zračenju, osim ako nije hlađeno. Kako bi smanjili zračenje tijela na temperaturi od 20°C samo za 1% , generirano približno na valnoj duljini od 4μm , morali bi ga ohladiti za 100°C [3]. Infracrveni spektar ima više različitih podjela koje su odredile međunarodne komisije i organizacije za standardizaciju.

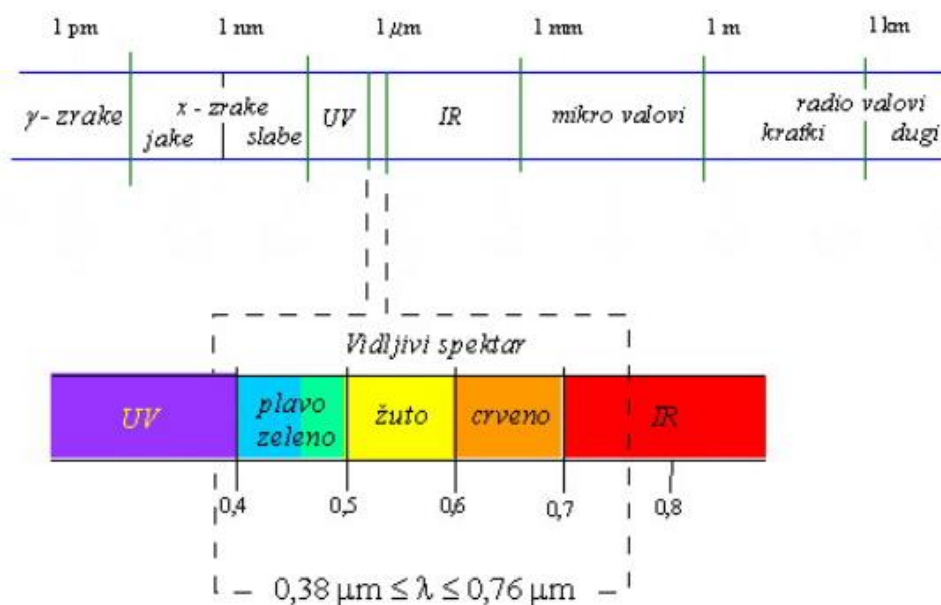
Ovdje ćemo ih podijeliti na tri veća dijela ovisno o detektorima koji se koriste da „uhvate“ zračenje.

Blisko infracrveno zračenje je detektirano pomoću posebne fotografske emulzije (do $1\mu\text{m}$), fotoemisijске ćelije (eng. Photoemissive cells) koje se još nazivaju i fotocijevi (eng. Phototubes) te fotootpornicima (eng. Photoconductors) i fotonaponskim detektorima (eng. Photovoltaics) [3]. Srednje infracrveno zračenje je detektirano pomoću termičkih fotootpornika i fotonaponskih detektora koji direktno pretvaraju toplinu u struju preko fotona. Zadnje, daleko infracrveno zračenje je detektirano pomoću različitih termičkih detektora.

Vidljivi dio spektra	Blisko infracrveno zračenje	Srednje infracrveno zračenje	Daleko infracrveno zračenje
0.35 μm	0.75 μm	1.5 μm	20 μm
			1000 μm

Sl.4.1. Podjela infracrvenog zračenja

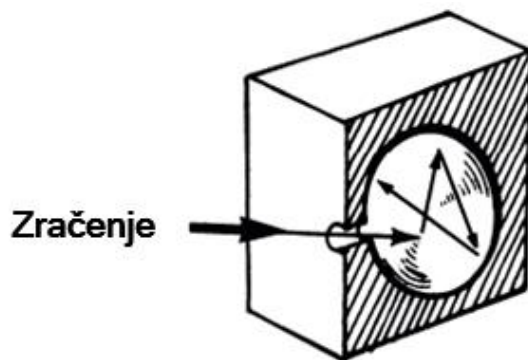
Osim infracrvenog zračenja, u elektromagnetskom spektru postoje i ostala zračenja. Svaka od njih je povezana s odnosom energije i valne duljine. Ipak, sve one imaju istu brzinu kretanja tj. brzinu svjetlosti c . Sa slike (Sl.4.2.) možemo primijetiti kako je vidljivi dio spektra, kojeg ljudsko oko može vidjeti, malen u odnosu na ostale zrake. On se prostire od 400 do 750 nm. Dvije najbliže vrste svjetlosti ili zračenja su infracrveno i ultraljubičasto zračenje. Radio valovi imaju najveću valnu duljinu, ali zato najmanju energiju koju prenose, dok su gama-zrake vrlo visoke frekvencije i energije.



Sl.4.2. Podjela elektromagnetskog spektra [13]

4.1. Zračenje crnog tijela

Bitan dio elektromagnetske teorije je Max Planckova teorija crnog tijela. Toplinska emisija krutih tijela obično se tretira u smislu koncepta crnog tijela. On je definiran kao objekt koji može u potpunosti apsorbirati zračenje, bez obzira na njegovu valnu duljinu. Postoje dvije praktične teorije: prva govori o okruglom, šupljem, zatvorenom tijelu koji ima jedan manji otvor kroz kojeg prolazi svjetlost. Sustav je napravljen da „zarobi“ svjetlost unutar svoje šupljine.



Sl.4.1.1. Prikaz crnog tijela [3]

Druga teorija predstavlja savršenu površinu koja također apsorbira zračenje. Po Kirchhoffovim zakonima, takav objekt ujedno i vraća zračenje svih valnih duljina. Ono prenosi

energiju u okolinu sve dok se ne postigne termodinamička ravnoteža [3]. Planckov zakon opisuje monokromatsko zračenje crnog tijela E_c , kao energiju zračenja emitiranu po jedinici površine i po valnoj duljini ($W/m^2\mu m$). Njegov izraz je :

$$E_c = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda \cdot T} - 1} \quad (4-4)$$

Valna duljina λ izražena je u μm , T je apsolutna temperatura u K, a konstante iznose $C_1 = 3,742 \cdot 10^8 W \cdot \mu m^4/m^2$ i $C_2 = 1,4389 \cdot 10^4 \mu mK$. Spektralno zračenje se pomiče prema kraćim valnim duljinama kako temperature raste što nam ukazuje Wienov zakon koji daje vezu između temperature i valne duljine na kojoj se nalazi maksimum spektralne gustoće:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu mK \quad (4-5)$$

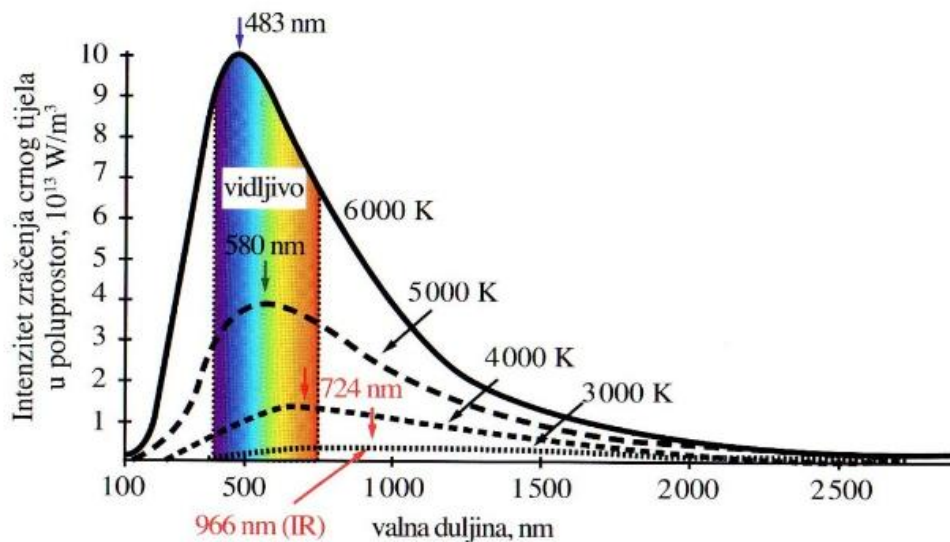
Ono također objašnjava promjenu u boji površine od crvene do bijele tijekom zagrijavanja. Vlastita emisija crnog tijela je zračenje emitirana s površine crnog tijela, na svim valnim duljinama, a njen iznos je opisan Stefan-Boltzmannovim zakonom:

$$E_c = \sigma \cdot T^4 W/m^2 \quad (4-6)$$

pri čemu je σ Stefan-Boltzmannova konstanta i iznosi $5,6697 \cdot 10^8 W/m^2K^4$. Spektralna gustoća zračenja crnog tijela bila je prva pojava koju klasična fizika, kako sada nazivamo fiziku poznatu do 1900-te godine, nije uspjela objasniti. Nju je uspješno objasnio M. Planck (1900). Došao je, naime, do zaključka da spektralnu gustoću $f_{ct}(\lambda, T)$ savršeno opisuje izraz:

$$f_{ct}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (4-7)$$

Gdje su c brzina svjetlosti u vakuumu, k Boltzmannova konstanta, a $h=6,626 \cdot 10^{-34} Js$ tada uvedena Planckova konstanta [4]. Planckovo zračenje je toplinsko zračenje koje je ovisno o temperaturi tijela. Što je viša temperatura tijela ono više zračenja vraća na svakoj valnoj duljini. Npr. na sobnoj temperaturi tijelo emitira infracrveno zračenje, ali pri višim temperaturama, kao što je površina Sunca, ono emitira velike količine i infracrvene i ultraljubičaste radijacije. Tijelo na višim temperaturama može emitirati velike količine zraka kratke valne duljine kao što su ultraljubičaste zrake pa čak i x-ray zrake [10].



Sl.4.1.2. Ovisnost zračenja o valnoj duljini[14]

Iz slike (Sl.4.1.2.) vidi se da emitirano zračenje za odabranu temperaturu ovisi o valnoj duljini, te da se konstantno mijenja kroz cijeli spektar. S porastom temperature raste i intenzitet emitiranog zračenja.

4.2. Svojstva materijala i karakteristična emisivnost

Jedna od osnovnih svojstava topline je njezina sposobnost prolaska kroz sva tijela trenutno. Ta toplina ovisi o toplinskom kapacitetu i toplinskoj otpornosti materijala kroz kojeg zagrijava [11]. Zračenje koje dolazi na površinu realnog tijela djelomično se apsorbira, djelomično reflektira, a djelomično propusti. Različiti materijali, ovisno o njihovoj strukturi i svojstvima, drugačije apsorbiraju i reflektiraju zračenje. Karakteristika medija mogu se definirati pomoću njegove dielektrične permitivnosti ϵ , magnetske permeabilnosti μ , električne provodnosti σ i gustoće električnog naboja ρ [3].

Dielektrici ili izolatori sadrže elektrone koji su snažno vezani za atomsku strukturu te njihove amplitudne vibracije ostaju male. Metali sadrže vrlo pokretne slobodne elektrone te imaju jaku apsorpciju na svim valnim duljinama. Također, metali su općenito vrlo reflektirajući. Pored metala, postoje i poluvodiči koji pokazuju svojstva obje vrste, vodiča i izolatora [3].

Materijali za optičke sustave, predviđeni za rad u infracrvenom području, moraju imati ili veliku propusnost (leće i prizme) ili veliku reflektivnost (zrcala). Nadalje, ta svojstva moraju biti stabilna i prikladna za obradu. Za sve optičke sustave koriste se posebne vrste stakla, prirodni ili sintetički kristali, sintetički (plastični) materijali i sl.[15]. Potrebno je voditi računa o fizičkim karakteristikama, uključujući i njihova mehanička, toplinska, električna i kemijska svojstva kao i različite cijene materijala. Optičko poliranje materijala je moguće samo od određene razine tvrdoće. Materijali koji su previše mekani nisu pogodni za proizvodnju optičkih komponenti. Najčešći materijal leće je germanij (Ge), koji je proziran za zračenja valnih duljina većih od 2 μ m. Mogu se koristiti i cinkov sulfid (ZnS), safir i kvarc (Al₂O₃), magnezij te silicij (Si). Kremen (kvarc) se upotrebljava za izradu prizmi za infracrvene kamere valnih duljina do 3,5 μ m te za izradu leća. Različiti kristali prikladni su za izradu optičkih elemenata za infracrveno zračenje. Prizme se izrađuju od kristala kao što su: natrijev klorid (NaCl), kalijev klorid (KCl) i kalijev bromid (KBr).

Kod IC termografije, točne vrijednosti koeficijenta emisije promatranog tijela od iznimne su važnosti za točno određivanje temperature tijela iz Stefan-Boltzmannovog zakona za realna tijela:

$$E_c = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ W/m}^2$$

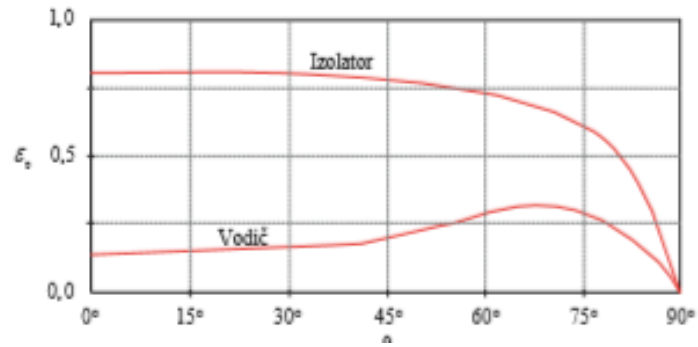
(4-8)

Pri čemu je ε koeficijent emisije površine realnog tijela. Idealno crno tijelo ima emisivnost jednaku jedan dok realna tijela imaju emisivnost uvijek manju od jedan. Emitivno svojstvo realnog tijela opisuje se pomoću koeficijenta emisije, koji se definira kao omjer vlastitog emitiranog zračenja realnog tijela i vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela pri istoj temperaturi:

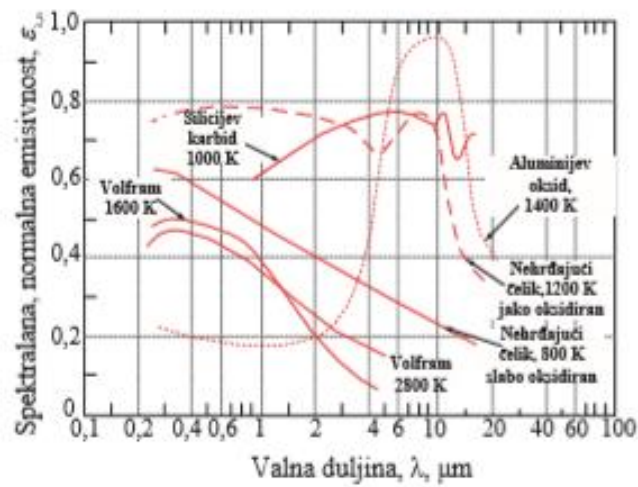
$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_c(T)}$$

(4-9)

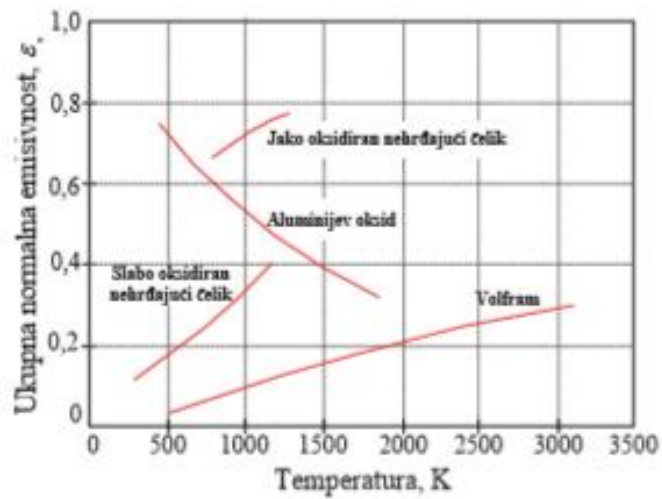
Emisivnost ovisi o faktorima kao što su temperatura, kut emisije i valna duljina izračene elektromagnetske energije. Ovisnost emisivnosti o kutu, valnoj dužini i temperaturi prikazana je na slikama (Sl.4.2.1, Sl.4.2.2, Sl.4.2.3.).



SI.4.2.1. Ovisnost emisivnosti u ovisnosti kutu promatranja[1]



SI.4.2.2. Promjena emisivnosti s promjenom valne duljine[1]



Sl.4.2.3. Promjena emisivnosti s promjenom temperature[1]

U praksi, koeficijent emisije za različite materijale se računa pomoću sljedećih izraza:

$$\varepsilon = 1,2 \cdot \varepsilon_n \quad \text{za sjajne metalne površine} \quad (4-10)$$

$$\varepsilon = 0,95 \cdot \varepsilon_n \quad \text{za glatke nemetalne površine} \quad (4-11)$$

$$\varepsilon = 0,98 \cdot \varepsilon_n \quad \text{za hrapave nemetalne površine} \quad (4-12)$$

Gdje ε_n predstavlja koeficijent emisije u smjeru normale, a on je predodređen i različit za materijale ovisno o stanju površine i vrijednosti temperature te se očitava iz tablica [16]. Primjer takve tablice za neke materijale je dan u nastavku (Tab.4.2.1).

Materijal	Stanje površine	Temperatura	Koeficijent emisije $\varepsilon_n(\vartheta)$
Čelik	ploča, hrapava, oksidirana	40 °C	0,94 – 0,97
Željezo	lijevano, oksidirano	100 °C	0,64
Drvo	hrastovina	38 °C	0,9
Staklo	glatko, ravno	0°C – 200°C	0,92 – 0,95
Guma	tvrda, crna	40 °C	0,95

Tab.4.2.1. Koeficijenti emisije materijala

5. PRIMJENA AKTIVNE INFRACRVENE TERMOGRAFIJE

Zbog veće dostupnosti i pada cijena termografskih kamera na tržištu u zadnjih desetak godina, termografija se razvila u dosta čestu metodu za istraživanje. Posebno se razvila primjena u vojne svrhe, za snimanje terena iz aviona ili umjetnih satelita, te industrijsku kontrolu, posebno za kontroliranje elektroničkih mikroelemenata [15]. Prije, korištena samo od strane vojne industrije, nije pronalazila namjenu u ostalim granama ljudskoga života. To se mijenja nakon završetka hladnoga rata kada termografija polako pronalazi svoju raznovrsnu primjenu [11]. Korištenje aktivne termografije koja ima prednost nad pasivnom, zbog svoje osjetljivosti, pronašla je svoju primjenu u zahtjevnijim procesima i tehnologijama. Primjena u električnoj industriji kod detekcije pogrešaka u integriranim krugovima i solarnih ćelijama, funkcionalna dijagnostika električkih komponenti i testiranje električnih uređaja, korištenje impulsne termografije u zrakoplovnoj industriji, kao i svemirskoj. Nadalje, plinske turbine su našle korist od infracrvene termografije kao i industrija medicine za otkrivanje bolesti i mapiranje vaskularnog stabla (eng. Vascular tree).

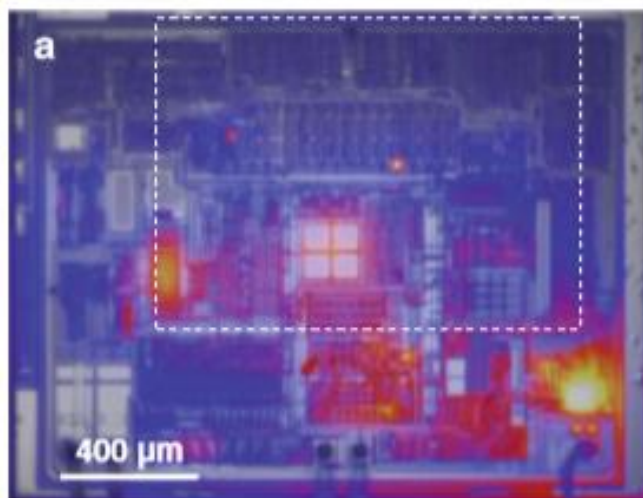
5.1. Primjena u analizi elektroničkih sklopova

Integrirani krug (eng. Integrated circuit, IC) je mikroelektronički element koji se sastoji od međusobno spojenih tranzistora i raznih ostalih komponenata. IC je mali čip koji može funkcionirati kao pojačalo, oscilator, tajmer, mikroprocesor ili računalna memorija. Integrirani krug je obično izrađen od silikona, koji može sadržavati stotine do milijune tranzistora, otpornika i kondenzatora. Ova izuzetno mala elektronika može izvoditi matematičke proračune i pohranjivati podatke koristeći digitalnu i analognu tehnologiju. Standardni dijagnostički alat za pregled integriranih krugova je mikroskopski termički pregled ili inspekcija. Pogreške poput odvodne struje (eng. Leakage current), kratkih spojeva (eng. Shorts) i stvaranja niske impedancije kod MOSFET tranzistora (eng. Latch-ups) dovode do izvora topline. Također, normalan rad integriranog kruga može dovesti do karakterističnog lokalnog grijanja, obično slabijeg, koje se može koristiti za analizu ispravnosti kruga. Postoje razne mikrotermičke metode testiranja integriranih krugova kao što su : tehnika s uporabom tekućih kristala, Schlieren-ovo slikanje (eng. Schlieren imaging), fluorescentno mikrotermičko snimanje i infracrvena mikrotermografija. Sve ove metode imaju svoje prednosti i nedostatke. Osnovni nedostatak infracrvene mikrotermografije

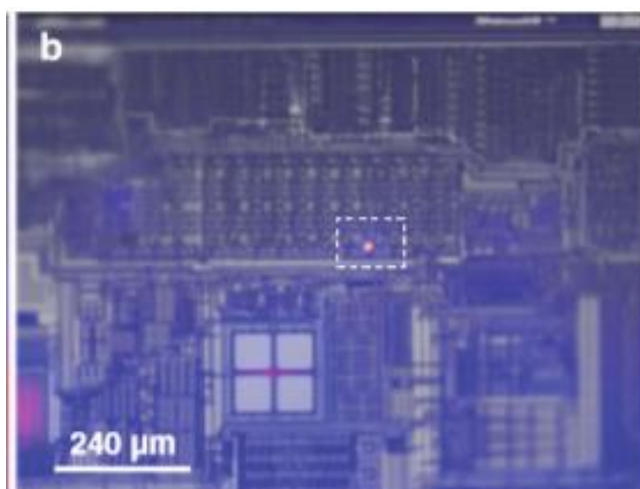
je ograničenost optičke rezolucije valnim duljinama detektiranog svjetla u rasponu od 5 μm . Ovo ograničenje se može u određenoj mjeri prevladati uporabom SIL leća (eng. Solid immersion lenses) koja pomiče granicu rezolucije blizu 1 μm . Drugi problem je kod moduliranja slike, gdje je teško razlikovati lokalne temperature infracrvene emisije i slabe temperature na sklopu. S tom termičkom osjetljivošću, samo relativno jake izvore temperature je moguće detektirati.

Zbog tih razloga, korištenje aktivne termografije, u ovom slučaju lock-in metode, omogućuje detekciju izvora topline iz uobičajenog rada integriranih krugova koje obično ostaju nevidljivi za ostale metode. Lock-in termografija značajno poboljšava osjetljivost za 3 reda veličine, približno od 100 mK do 100 μK . Otkriveno je da lokalni toplinski izvor ispod 5 μW na površini silikonskog čipa (eng. Silicon die) je još uvijek moguće detektirati nakon vremenskog mjerenja od otprilike 30 minuta korištenjem lock-in termografije. To poboljšanje u osjetljivosti omogućava veliki broj novih primjena u termičkom ispitivanju integriranih krugova.

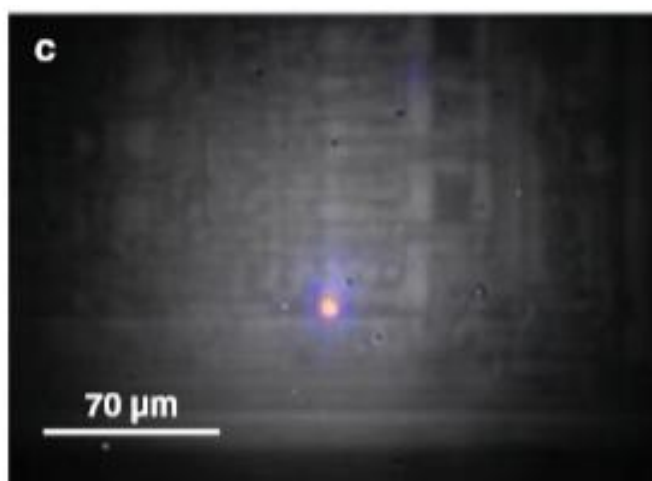
Svaka analiza kvara integriranog kruga započinje slikom niskog uvećanja kako bi se otkrilo mjesto dominantnog, traženog izvora topline na cijelom čipu. Kao što je već rečeno, osjetljivost koju nudi aktivna termografije daje mogućnost da nijedna oštećenja nisu premala da bi se otkrila pa ni pri malom povećanju. Sljedeće mjerenje koristi puno veće uvećanje, pri visokoj frekvenciji, koje daje detalje oko prostora lokalne topline. Konačno, moguće je uporaba SIL leća koje se koriste za otkrivanje položaja greške što je moguće bolje. Ova procedura je prikazana u sljedećem primjeru gdje se analizira čip pomoću tehnike lock-in termografije. Na slici a) (Sl.5.1.1) korištena je frekvencija od 10 Hz s 2,5 \times objektivom koja je dala cijelu sliku čipa. Greška u ovome uređaju je točkasti izvor u uokvirenom dijelu. Za sliku pod b) (Sl.5.1.2) korišten je objektiv s uvećanjem od 5 \times i frekvencija, povećana na 25 Hz. Na kraju, slika pod c) (Sl.5.1.3) daje detaljan prikaz uokvirenog dijela sa slike b). Korištena je ista frekvencija od 25 Hz, ali sa SIL lećama koje su dodatno povećale prikaz za 3,5 puta.[10]



Sl.5.1.1. *Prikaz cijelog čipa (2,5× objektiv)[10]*



Sl.5.1.2. *Uvećan prikaz čipa (5× objektiv)[10]*



Sl.5.1.3. Detaljan prikaz uokvirenog dijela (5× objektiv i SIL leća)[10]

5.2. Fotonaponski modul i ćelije

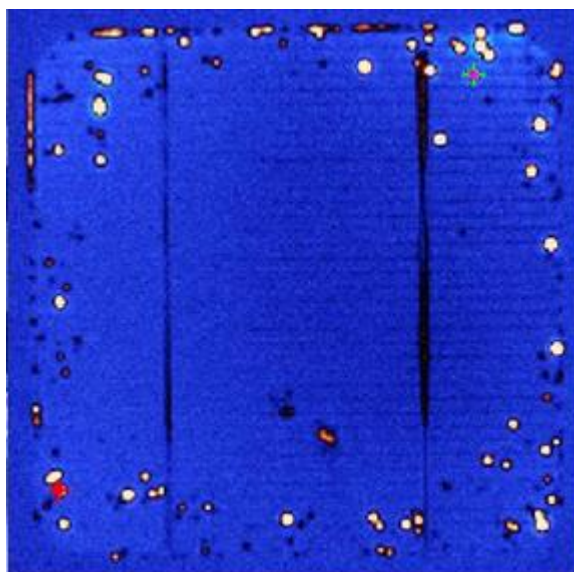
U ovome dijelu govorit će se o ispitivanju fotonaponskih ćelija i članaka pomoću lock-in termografije, točnije nad kristalnim silicijskim solarnih ćelijama koje su napravljene od mono ili polikristalnog silicija koje dominiraju na tržištu fotonaponskih materijala. Silikonski solarni članci su jednostavni elektronički uređaji koji se sastoje od PN-spoja diode. PN-spoj nastaje kada se jednom dijelu kristala čistog poluvodiča dodaju trovalentne (akceptorske) primjese, tako da nastane p-tip poluvodiča, a drugom dijelu peterovalentne (donorske) primjese, te nastaje n-tip poluvodiča. Između njih se stvara razlika napona i time tok struje teče kroz priključeni potrošač. U praksi se koriste solarni paneli, koji se sastoje od više solarnih ćelija spojenih serijski da se dobije veći napon i paralelno da se dobije veća struja [15]. Materijal koji se danas koristi za izradu većine solarnih ćelija je polikristalni materijal, najčešće silicij.



Sl.5.2.1. Eksperiment aktivne termografije na solarnoj ćeliji [17]

Zanimljivost oko solarnih ćelija je homogenost i strujno-naponska karakteristika uređaja. Ispitivanja nad solarnih ćelijama se izvršavaju zbog informacija i fizičkih podataka koje dobivamo

mjerenjem. Gotovo sve solarne ćelije pokazuju određena lokalna mjesta povećanog toka struje. Ta mjesta povećanog toka struje, koja ne moraju biti kratki spoj u elektrotehničkom smislu, umanjuju djelotvornost čitavog uređaja i moraju biti smanjene na minimum. Metoda koja se koristi za ispitivanje homogenosti struje naziva se tamna lock-in termografija (eng. Dark lock-in thermography, DLIT) te se ona izvodi u mraku bez ozračivanja uzorka koje se testira. To je poznata metoda za istraživanja i razvoj vezanih uz solarne ćelije. U praksi, solarne ćelije su osvijetljene svjetlošću. Ako se termografija izvršava na solarnih ćelijama pod bilo kojom vrstom osvjjetljenja, govorimo o osvijetljenoj lock-in termografiji (eng. Illuminated lock-in thermography, ILIT) [10]. Ta metoda donosi otkrivanje grešaka kao kratkih spojeva prednje i zadnje strane ćelije (takozvani „shunts“) kao i o problemima otpora u solarnim ćelijama. Na slici (Sl.5.2.2) vidimo otkrivanje „shuntsa“ i mikro pucanja kristalne solarne ćelije[18].

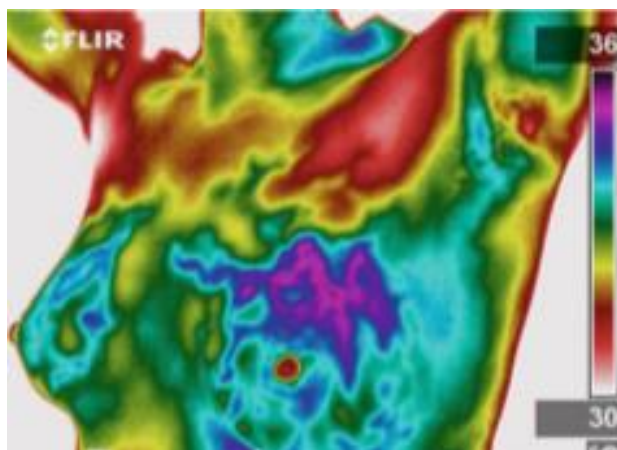


Sl.5.2.2. *Termogram solarne ćelije* [18]

5.3. Primjena u medicini

Korištenje infracrvene termografije je već poznata tehnika za otkrivanje raznih bolesti u medicini. Tjelesna temperatura, važan je pokazatelj ljudskoga zdravlja, pa je time i infracrvena termografija dobila pažnju. Mjerenje temperature infracrvenim kamerama ima posebne prednosti za liječnike, ali i za pacijente. Ono daje preciznu raspodjelu temperature pacijenta. Postupak

pronalaska bolesti povezan je s iritacijom tijela. Dijelovi tijela koji su „zaraženi“ izlažu se hladnoći. Zdrave regije tijela i organi uravnotežuju ovu intervenciju na tjelesnoj toplini na drugačiji način nego nezdravi dijelovi tijela. Termografija se koristi kao vrlo važan alat tijekom pregleda pacijenata i za razliku od drugih tehnologija, poput rendgenske snimke, na tijelo ne primjenjuje dodatni stres. Na primjer, ovaj postupak je tipičan za rano otkrivanje raka dojke. Primjena termografije u medicini je opširna i složena kao što je i medicina sama po sebi. Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, zajednički napor biomedicinskog inženjerstva i medicinskih stručnjaka rezultirali su razvojem tehnološkog napretka u tehnologiji infracrvenog senzora, obradi slike, organiziranom spremištu znanja i njihovoj cjelokupnoj integraciji u sustav. Sve to omogućilo je nove alate istraživanja i korištenje u medicinskoj termografiji. Problemi kao što su: probavne smetnje, sindrom iritabilnog crijeva, divertikulus, Chronova bolest, dijagnoza bolova i praćenje napretka tretmana, detekcija abnormalija dojke kao i rani razvoj raka dojke, vaskularne bolesti, limfni čvorovi i nadalje [19].

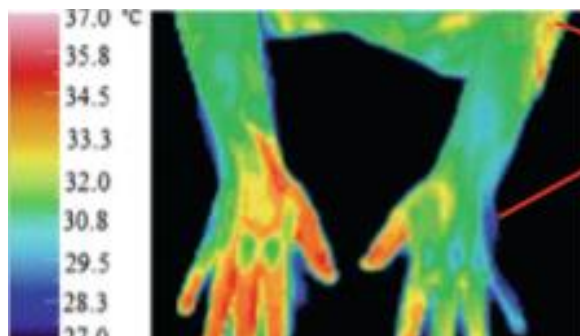


Sl.5.3.1. *Termogram raka dojke [19]*

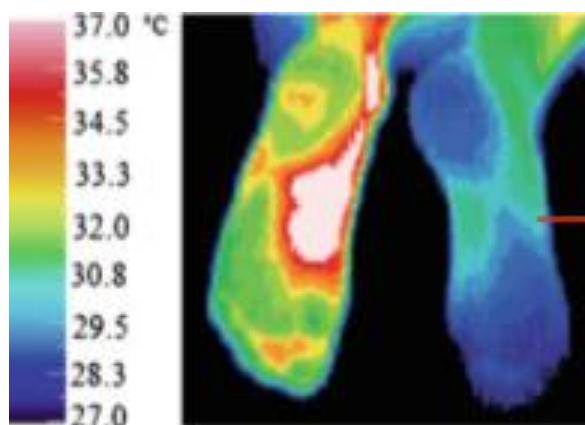
Krajem 50-tih godina 19-tog stoljeća, kirurg Dr. R. Lawson otkriva da pacijenti oboljeli od raka dojke pokazuju višu površinsku temperaturu kože na mjestima zahvaćenim rakom [13]. Sa slike (Sl.5.3.1) možemo vidjeti razliku u temperaturama dojke pacijenta, što predstavlja abnormaliju dojke. Zbog te razlike, rak dojke se može prepoznati u ranoj fazi.

Termografija može biti korisna pacijentima koji pate od bolova koji drugi testovi ne mogu diagnosticirati. Također, vrlo je korisna za precizno i objektivno prepoznavanje mišićnih kompleksa te omogućava liječniku oko odluka za cjelokupni plan liječenja. Na primjer, pacijent,

golf igrač, koji se žali na bol u laktu koja je povezana s tetivom mišića podlaktice. Istraživanjem termografskog testa izlaganja tijela hladnoći , otkriven je rani sindrom karpalnog kanala (Sl.5.3.2.) [19].

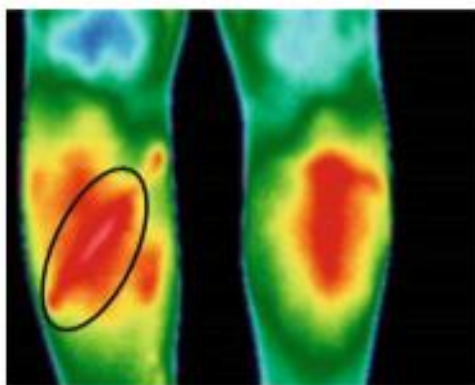


Sl.5.3.2. Termogram pacijenta sa sindromom karpalnog kanala [19]

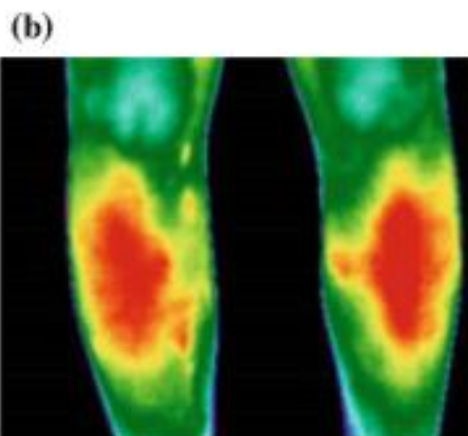


Sl.5.3.3. Termogram pacijenta sa sindromom boli u desnom stopalu [19]

Dodatni primjer je slučaj nesreće skijaša s ozbiljnom ozljedom kao prijelom kosti. Termogram prikazan na slici Sl.5.3.4.a dostavljen je nakon 3 mjeseca nakon prijeloma. Nakon oporavka (Sl.5.3.4.b) možemo uočiti toplinske razlike dviju strana termograma [19].

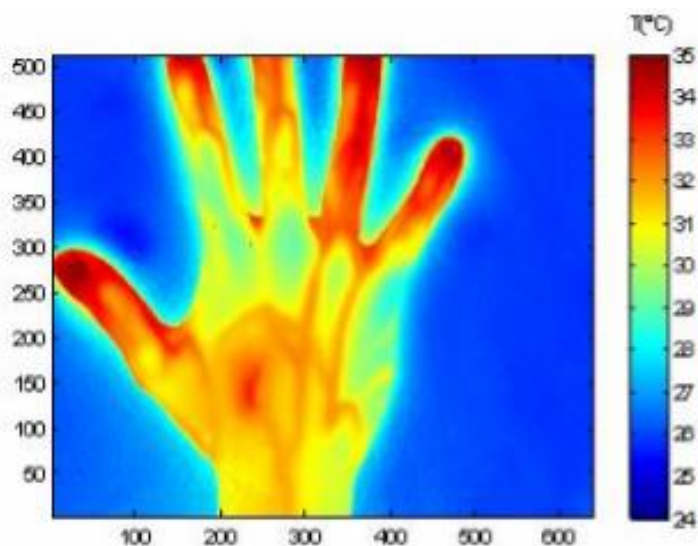


Sl.5.3.4.a Termogram skijaša nakon prijeloma[19]



Sl 5.3.4.b Termogram skijaša nakon tretmana i oporavka [19]

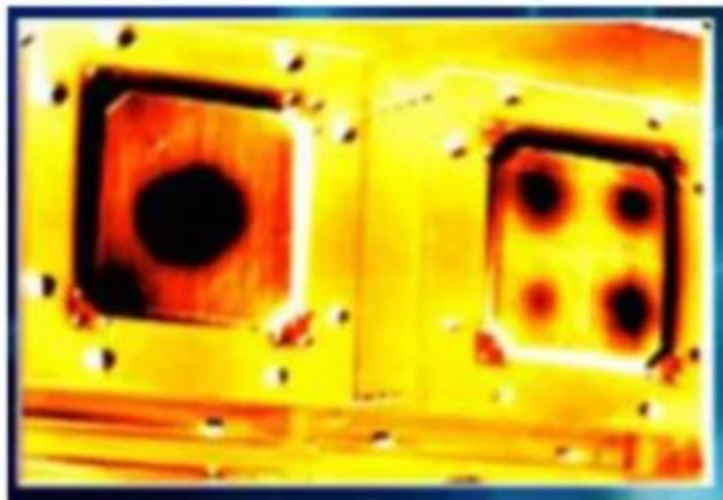
Pomoću termografije moguće je tehnika mapiranja ruku kao vaskularno ili arterijsko stablo. Korištenjem prirodnog ljudskog krvožilnog sustava i kontroliranog pritiska oko ruke, provodi se tehnika lock-in termografije. Budući da je frekvencija simulacije obrnuto proporcionalna dubini inspekcije, za potkožni sloj je potrebna vrlo mala frekvencija. Struktura vena ruku termički se preslikava infracrvenom kamerom koja djeluje u području srednjeg vala na sobnoj temperaturi. Dobivene slike pokazuju gradijent temperature između okolnih tkiva i stražnjih vena. Ovaj način izrade mapa krvožilnog sustava može se upotrijebiti za ranu dijagnozu venskih bolesti poput primitivne varikoze i tromboze dubokih vena (eng. Deep vein thrombosis, DVT). Dodatno, moguća je i baza podataka vena za identifikaciju [20].



5.4. Zrakoplovna i svemirska industrija

Termografija aktivnog protoka topline omogućuje ispitivanje modernih kompozitnih materijala (eng. Composite materials) i laganih građevinskih elemenata. Kompozitni materijali su materijali izrađeni kombiniranjem dvaju ili više materijala, često onih koji imaju vrlo različita svojstva. Zbog toga spoj tih materijala djeluje kako bi dali kompozitu jedinstvena svojstva. Moderni kompoziti sve se više koriste u zrakoplovnim i svemirskim strukturama zbog velikog omjera čvrstoće i težine. Procjenjuje se da kompozitni materijali čine oko 50% težine trenutne generacije zrakoplova i koriste se za kućišta motora, krila, rep zrakoplova [21]. Unatoč brojnim prednostima, kompozitni materijali vrlo su osjetljivi na male, skrivene nedostatke koji se mogu pojaviti u bilo kojem trenutku tijekom životnog ciklusa komponenti. Posebice, primjena lakih i čvrstih kompozitnih materijala i drugih laganih građevinskih materijala u zrakoplovnoj industriji zahtijevaju preciznu kontrolu kvalitete. Neotkriveni nedostaci, mogu uzrokovati iznenadne i katastrofalne posljedice cijele strukture. Kombinacija rezultata mjerenja iz digitalne slike i podataka o mjerenju temperature infracrvenim kamerama, omogućuje istodobnu analizu toplinskog i mehaničkog ponašanja za ispitivanje materijala i komponenata. Mjerenje u zrakoplovnoj industriji često zahtijeva infracrvene kamere s vrlo visokom toplinskom razlučivošću od 20 mK i visokom frekvencijom od 100 Hz i više.

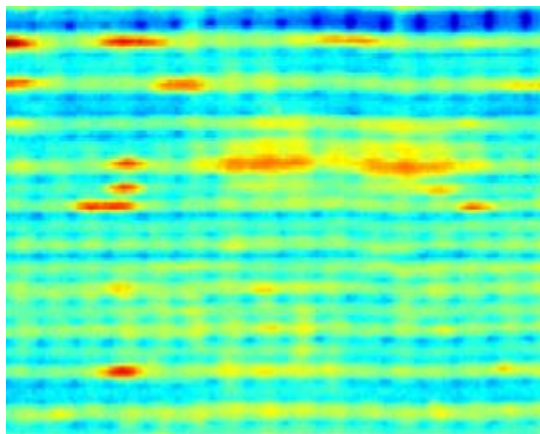
Ovdje govorimo o pregledu velikih zrakoplovnih komponenti poput trupa, krila i lopatica rotora zrakoplova, odnosno helikoptera, dijelova zrakoplovnih motora, komponenti svemirskih letjelica koje se provode analizom grešaka uporabom aktivne termografije. Također, koristi se i kod detaljne inspekcije zračnih turbina (eng. Jet Gas Turbines). Danas se impulsna termografija široko koristi u zrakoplovnoj industriji, industriji proizvodnje električne energije i automobilske industriji. Neke od uobičajenih šteta koje se detektiraju ovom metodom su: štete nastale od udarca, poroznost, prolazak vode (eng. Water ingress), korozijska oštećenja, ali i svrhu pronalazi u mjerenju debljine materijala te detekciji nepoznatih objekata (eng. Foreign object debris, FOD). Ta se oštećenja mogu pojaviti u bilo kojoj fazi životnog ciklusa komponenti, od proizvodnje do korištenja i održavanja.



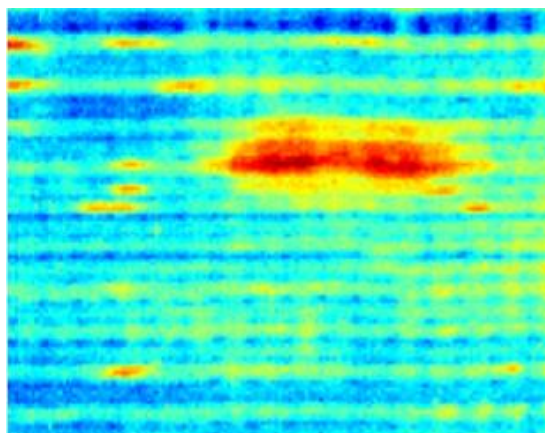
Sl.5.4.1. *Rezultat impulsne termografije polimera svemirske letjelice [21]*

Sa slike (Sl.5.4.1) možemo vidjeti crne rupe koje odgovaraju oštećenjima na uzorku kompozita snimljenog infracrvenom kamerom koristeći metodu impulsne termografije.

Kompozitni materijali, zbog svoje relativno male toplinske vodljivosti u usporedbi s metalima, omogućavaju primjenu aktivne infracrvene termografije kao metode bez razaranja temeljene na ostvarivanju toplinskog toka putem halogenih reflektora ili lampi. Toplinski val prodire kroz kompozitni materijal i širi se unutar materijala odbijajući se o granice grešaka. Sa slike (Sl.5.4.2) vidimo oštećenja na objektu koji je izrađen od plastike koji je ojačan ugljičnim vlaknima (eng. Carbon fibres). Oštećeni uzorak ispituje se lock-in metodom koristeći različite periode kako bi dobili slike drugačijih dubina i prostorne razlučivosti. Na prvoj slici (Sl.5.4.2) period pobude je $P=72s$ što odgovara vrijednosti frekvencija srednjeg raspona. Toplinski val ima dovoljno energije da prodre unutar materijala otkrivajući oštećenje. Na drugoj slici (Sl.5.4.3) jasno se vidi oštećenje na kompozitnom materijalu gdje je korišten period pobude $P=120s$ [11]. Mala frekvencija prenosi veliku energiju koja prodire duboko u materijal, čineći oštećenja jasno vidljiva.



Sl.5.4.2. *Termogram kompozitnog materijala sa slabo vidljivim oštećenjem [11]*



Sl.5.4.3. *Termogram kompozitnog materijala sa jasno vidljivim oštećenjem [11]*

Pasivna infracrvena termografija se obično koristi za materijale koji nisu u toplinskoj ravnoteži i imaju različitu temperaturu od okoline u kojoj se nalaze. S druge strane, aktivna termografija koristi vanjske izvore pobude kao što su optičko zračenje, gdje se koriste halogene lampe i laseri. Nadalje, upotreba elektromagnetskih valova tijekom simulacije te ultrazvučnih valova koje omogućuju stvaranje topline unutar kompozitnih materijala tijekom testiranja. Najčešće korištene metode aktivne infracrvene termografije za zrakoplovne primjene su: impulsna, lock-in, periodična te frekvencijsko modulirana termografija. Kompozitni materijali ojačani ugljikom, korišteni u ovome eksperimentu, su od posebnog interesa za vozila i zrakoplovnu industriju. Ipak, još uvijek nedostaje dubok pregled koji uključuje principe, nedavna dostignuća, snaga i ograničenost infracrvene termografije unutar zrakoplovne industrije.

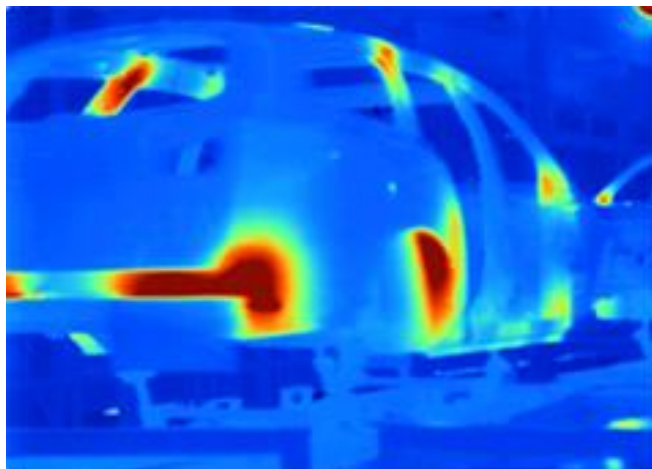
5.5. Automobilaska industrija

Jedna od ciljeva današnje automobilske industrije je reducirati težinu automobila, ali s druge strane kupci i vlasti zahtijevaju sve veću sigurnost i udobnost što zahtjeva dodatne komponente u automobilima. One se postižu laganim strukturama koje su precizno dizajnirane za potrebe statičke i dinamičke sile. Stoga, automobilski inženjering sve više zahtjeva najsuvremeniju kontrolu kvalitete. Kako bi se osigurala njihova kvaliteta, komponente se moraju pregledati pomoću nerazornih metoda tj. infracrvene termografije. Aktivna termografija nudi pouzdana rješenja za testiranje u automobilskoj industriji, od dizajna elektronike, ispitivanje motora, osiguravanja kvalitete zglobova u automobilskoj industriji (eng. Joints), pa čak i istraživanja na unutarnjem izgaranju ili električnog pogona na novim generacijama motora.



Sl.5.5.1. *Termogram motora automobila [22]*

Ovaj postupak omogućuje ispitivanje strukturnih i elastičnih ljepila (eng. Adhesives), mehaničkih spojeva i laserski zavarenih spojeva, ali i analiza za brzo-rotirajuće objekte poput guma ili kočnica [23]. Nadalje, nedostaci proizvoda se otkrivaju temperaturnim promjenama što je idealno za testiranje funkcionalnosti grijanih sjedala i grijanje prozora pomoću infracrvenih kamera.



Sl.5.5.2. *Okvir automobila (eng. Unibody) [24]*

Novi automobili i koncepti automobila prolaze kroz velike količine testiranja prije puštanja u promet. Jedan aspekt u kojem termografija igra ulogu je sigurnost i udobnost putnika. Pravilno postavljena izolacija u strukturi prototipa automobila može povećati udobnost putnika i smanjiti razinu buke. Slika (Sl.5.5.2) pokazuje izolacijsku pjenu na okviru automobila.

6. INFRACRVENA TERMALNA KAMERA

Termografska kamera je središnji objekt termografskog sustava. Termografski sustav je skup uređaja koji služi snimanju, zapisivanju i obradi termograma koji može biti objedinjen u jednom komadu opreme ili sastavljen od više komponenti. Suvremeni složeni sustavi, osim termografske kamere imaju računalo s aplikacijama za obradu i analizu slike [14].

Infracrvene, termičke kamere omogućuju da otkrijemo određene probleme prije nego što dovedu do kvarova. One ubrzavaju dijagnozu te smanjuju i pomažu pri izbjegavanju neplaniranog prekida rada uređaja kao i smanjivanje štete na određenim strukturama. Prednosti termografije, gdje se koriste ovakve kamere omogućuju: prikupljanje podataka u opasnom okruženju sa sigurne udaljenosti, brzo skeniranje većih površina poput zidova, stropova i krovova, prikupljanje podataka bez ometanja proizvodnje te brzo prepoznavanje nepravilnosti na određenim mjestima . Postoji nekoliko vrsta infracrvenih kamera koje se koriste u pasivnoj i aktivnoj termografiji. Od džepnih kamera za električnu i industrijsku inspekciju do kamera visoke rezolucije za detaljnu i naprednu inspekciju gdje se osim vidljive, šalje i analizira toplina. Takve kamere se koriste u aktivnoj termografiji gdje je potrebno poslati val topline za napredne procese.



Sl.6.1. *Fluke RSE300 infracrvena kamera visoke rezolucije [26]*

IC kamere pomoću detektora prima zračenje i pretvara ga u električni signal. U samoj kameri integrirana je IC optika, osjetnik IC zračenja, jedinica za pretvorbu električnog u video signal, monitor i kartica za pohranu podataka. Osjetnik u termografskoj kameri mjeri količinu energije koja pada na njegovu površinu i koja odgovara intenzitetu zračenja definiranog dijela

infracrvenog spektra. S kartice koja se nalazi u kameri, računalo obrađuje podatke prema određenom softveru kako bi stvorio termograme. Materijali koji se koriste za izradu leća kamera moraju biti propusni za infracrveno zračenje, a to su : germanij, cink sulfid, cink selenid za dugovalna infracrvena zračenja te silikon, safir, kvarc ili magnezij za srednjevalna infracrvena zračenja. Nadalje, kako bi se iz zračenja prispjelog na osjetnik kamere izračunala vrijednost temperature promatranog objekta, potrebno je poznavati svojstva površine objekta, temperaturu okoliša i objekata okoline, udaljenost postavljene kamere od promatranog objekta, temperaturu i vlažnost zraka. Svi ti podaci se unose u softver kamere prije mjerenja. Najpogodnije je svesti utjecaj okoline na minimum, kako ne bi došlo do pogrešaka pri mjerenju i analiziranju [8].



Sl.6.2. INFRATEC *ImageIR 10300* infracrvena kamera[27]

Naknadna obrada snimljenih termograma na računalu može biti kvalitativna, što podrazumijeva samo uočavanje mjesta različitosti ili kvantitativna što uključuje utvrđivanje iznosa temperatura, temperaturnih razlika ili emisijskih faktora po pojedinim lokacijama na termogramu. Danas, postoji veliki raspon infracrvenih kamera na tržištu, kao i brojni proizvođači za iste. Često, proizvođači uz svoju ponudu kamera nude i svoje softvere za termičku analizu i stvaranje, uređivanje termograma. U inspekcijama objekata u velikim industrijama gdje se pronalaze pogreške nevidljive ljudskom oku mogu spriječiti teške posljedice u proizvodnji, ali i nakon nje.

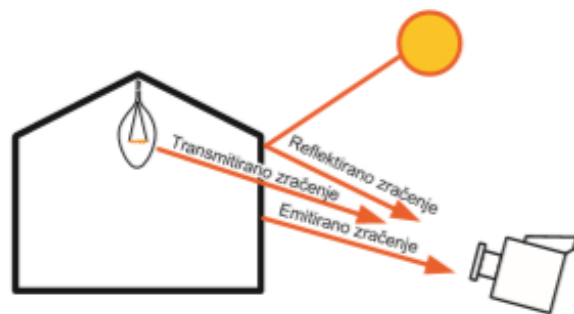
6.1. Osnovne karakteristike termalnih kamera

Termalne kamere se mogu opisati s više osnovnih karakteristika:

- Prostorna razlučivost
- Temperaturno područje rada

- Razlučivost temperaturne razlike
- Točnost
- Brzina obnove slike (frekvencija)

Ove karakteristike ovise o termografskom sustavu (kamera, osjetnik, zaslon itd.), o svojstvima promatranog objekta (geometrijskim karakteristikama, emisijskim i transmisijskim svojstvima materijala), o utjecaju okoline (zračenja okolnih tijela, udaljenost objekta). Prilikom snimanja, IC kamera ne mjeri temperaturu već registrira zračenje koje se predstavlja kao prividna temperatura. Razlog tome je što registrirano zračenje ovisi o zračenju samog tijela, transmitiranom zračenju i reflektiranom zračenju (Sl.6.1.1) [1].



Sl.6.1.1. Prividna temperatura koju registrira termalna kamera[1]

Prostorna razlučivost je podatak koji govori o veličini najmanjeg objekta koji je moguće razlučiti na termogramu. On ovisi o udaljenosti objekta i broju osjetnika u detektoru kamere, gdje detektori omogućuju skeniranje vidnog polja . Podatak o prostornoj razlučivosti se označava kao FOV i IFOV (eng. Instantaneous Field Of View). *Temperaturno područje rada* prvobitno ovisi o vrsti osjetnika IC kamere tj. njegovom području osjetljivosti. Termalne kamere koje imaju osjetnike s osjetljivošću u području većih valnih duljina koriste se za mjerenje područja niskih temperatura, dok će kamere s osjetljivošću u području kraćih valnih duljina biti namijenjene višim temperaturama. *Razlučivost temperaturne razlike* pokazuje koja je najmanja temperaturna razlika koju će kamera registrirati. Ona ovisi o sposobnosti sustava da izdvoji signal od šuma tj. smanji smetnje. Obično se označava s NETD (eng. Noise Equivalent Temperature Difference). Današnje termalne kamere imaju temperaturnu razlučivost od 0.1°C do 0.01°C . Ipak, ona ne garantira točnost mjerenja u određenim granicama temperaturne razlučivosti termalne kamere. *Točnost kamere* govori o pouzdanosti kvalifikacije temperature iz termograma uz uvjet da su sva podešenja

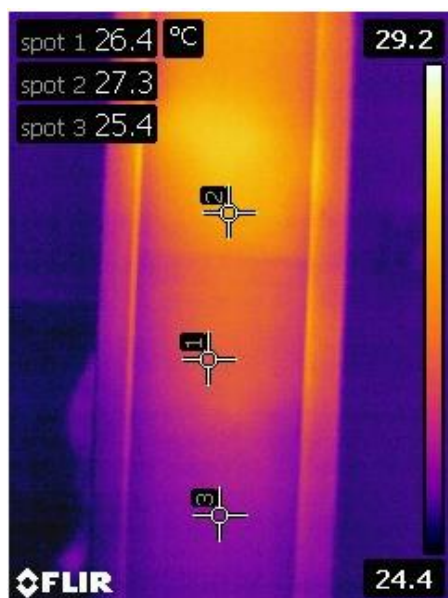
sustava optimalna i u skladu sa stvarnim stanjem objekta i okoline. Ona se izražava rasponom dopuštenog odstupanja temperature koja je kod kamera namijenjenih za istraživanje i razvoj ispod $\pm 1^{\circ}\text{C}$. *Brzina obnove slike (frekvencija)* predstavlja brzinu promjene temperature i drugih parametara termalne kamere. Suvremene kamere obnavljaju sliku s frekvencijom od 30Hz, ali i znatno brže[14].

6.2 Praktična provedba infracrvene termografske analize dijela unutrašnjeg zida zgrade

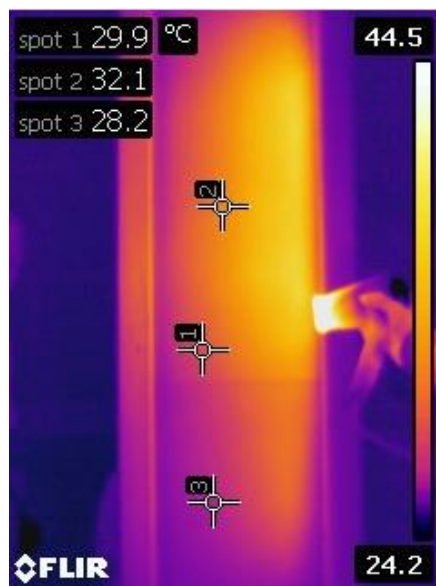
Praktični dio rada obuhvaća analizu dijela unutrašnjeg zida zgrade Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, provedenu 20. rujna 2019. Toplinskom pobudom smo pokušali utvrditi položaj nosive konstrukcije gips-kartonskih ploča po uzoru na [25].

Kod ovog postupka morali smo imati kontinuiranu pobudu kao toplinu. U ovom slučaju korišteno je sušilo za kosu (snage 1300W) kako bi zagrijali površinu zida. Termogrami su snimljeni infracrvenom kamerom FLIR E60bx razlučivosti 320×240 piksela, osjetljivosti $< 0,045^{\circ}\text{C}$, temperaturnog raspona od -20°C do 250°C .

Prvobitno smo pretpostavili mjesta interesa gdje se očekuje da postoje skriveni elementi. Lupkanjem po zidu pronašli smo šuplja mjesta na elementu konstrukcije zgrade napravljenog od gips-kartonske ploče. Eksperiment započinje zagrijavanjem površine nosećeg zida s prednje strane (Sl.6.2.1 i Sl.6.2.2).



Sl.6.2.1. Promjena temperature zida tijekom zagrijavanja



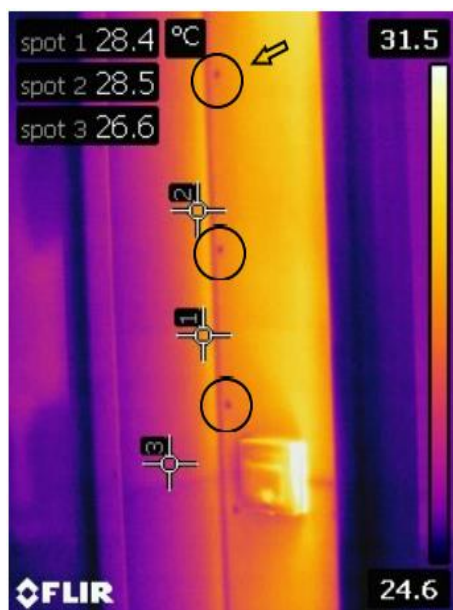
Sl.6.2.2. Temperatura zida nakon 20-tak sekundi od početka zagrijavanja

Nakon prvog dijela snimanja nismo uočili nikakve skrivene elemente. Nastavljena analiza, provedena je zagrijavanjem zida pored nosećeg elementa (Sl.6.2.3).



Sl.6.2.3. Iznalaženje konstruktivnih elemenata gips-kartonskih ploča

Hlađenjem zida nakon jedne minute, možemo vidjeti spojne vijke ispod površine zida (Sl.6.2.4). Osim njih, uočili smo položaj ljepila s kojim je spojena gips kartonska ploča na noseći dio konstrukcije unutrašnjeg zida(Sl.6.2.5). Položaj ljepila nije vidljiv na slikama (Sl.6.2.1. i Sl.6.2.2.) iz čega se može zaključiti da za termografsku analizu treba vremena. Konstrukcija se nakon 5 do 6 minuta od prvog dijela snimanja ohladila i otkrila skrivene elemente.



Sl.6.2.4. *Položaj spojnih vijaka s kojima su učvršćene gips-kartonske ploče inače nevidljivi u vidljivom dijelu spektra*



Sl.6.2.5. *Položaj kontaktne površine gips-kartonskih ploča i noseće konstrukcije*

7. ZAKLJUČAK

Infracrvena termografija kao beskontaktna metoda analiziranja objekata, svoju je primjenu pronašla u velikom rasponu ljudskog života i djelatnosti. Razvijanje ove metode počelo je znanstvenim otkrićem infracrvenog zračenja te se nastavila tijekom polovice 20-tog stoljeća do danas. Danas postoje i druge metode kao eksperimentalna provjera materijala i elemenata, ali aktivna termografija nudi veliku osjetljivost koja može prodirati kroz objekte velike debljine i složene strukture. Uporaba aktivne termografije u velikim industrijama poput automobilske, zrakoplovne, svemirske, elektroničke kao i u medicini doprinosi u razvoju proizvodnje, pronalasku potencijalnih kvarova, bolesti i cjelokupne efikasnosti takvih postrojenja. Infracrvena termografija koristi se u industriji više od 30 godina i još uvijek nije ispunila svoj puni potencijal. Kako se industrija nastavlja mijenjati i rasti, pojavljuju se nove aplikacije i zahtjevi u kojima se može koristiti termalno snimanje, a brojne vodeće firme nastavljaju razvijati termografske sustave kako bi udovoljili tom napretku.

LITERATURA

- [1] H. Glavaš, T. Barić, M. Stojkov, *Primjena infracrvene termografije u tehničkim sustavima*: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Osijek, 2017.
- [2] S. Švaić, I. Boras, D. Dović, M. Suša, P. Drviš, D. Shejbal, *Infracrvena termografija - drugi par očiju*, EGE, Energetika, Gospodarstvo, Ekologija, Etika. 1, 2004.
- [3] G. Gaussorgues, *Infrared Thermography*: Springer Netherland, 1994.
- [4] V. Henč-Burtolić, P. Kulišić, Valovi i optika, Školska knjiga, Zagreb, 2004.
- [5] Infracrveni detektori, preuzeto: <https://www.hamamatsu.com>
Pristup ostvaren: 4.9.2019.
- [6] Povijest razvoja termografije, dostupno na: <https://www.nachi.org/history-ir.htm>
Pristup ostvaren: 26.8.2019.
- [7] Raymond A. Serway, John W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*: Brooks/Cole, Boston, 2013.
- [8] B. Milovanović, *Infracrvena termografija*. Zagreb: Građevinski fakultet u Zagrebu, 2018.
- [9] B. Milovanović, *Karakterizacija oštećenja armiranog betona primjenom metode infracrvene termografije, doktorski rad, Građevinski fakultet u Zagrebu*, Zagreb, 2013.
- [10] O. Breitenstein, W. Warta, M. Langenkamp, *Lock-in Thermography, Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials*, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [11] P. Bagavac, *Lock-in thermography image procesing*: Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Split, Split, 2016.
- [12] E. D'Accardi, D. Palumbo, R. Tamborrino, P. Cavallo, U. Galletti, *Pulsed Thermography: evaluation and quantitative analysis of defects through different post-processing algorithms*, 4th Quantitative InfraRed Thermography Conference, Berlin, 2018
- [13] H. Marinac, D. Đurđević, *Primjena infracrvene termografije u održavanju stambenih objekata*, 2010.
- [14] Z. Fridel, *Kontrola termografskih uzoraka i postupnici za provedbu termografskih mjerenja*: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [15] Lj. Majdandžić, *Fotonaponski sustavi*, Srednja škola Oroslavje, 2013.
- [16] M. Andrassy, I. Boras, S. Švaić, *Osnove termografije s primjenom*: Kigen, Zagreb, 2008.
- [17] L. Muzika, M. Švantner, M. Kučera, *Lock-in and pulsed thermography for solar cell testing*, University of West Bohemia, Češka, 2018.

- [18] Termogram solarne ćelije, preuzeto: <https://www.automationtechnology.de/cms/en/solar-cell-inspection/>
Pristup ostvaren: 4.9.2019.
- [19] Y. K. Eddie, M. Etehadtavakol, *Application of Infrared to Biomedical Sciences*: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2017.
- [20] N. Bouzida, A. H. Bendada, J.Piau, M. Akhloufi, X. Maldague, M. Raymond, *Using lock-in infrared thermography for the visualization of the hand vascular tree*: Procedures of SPIE, Thermosense XXX vol. 6939, 2018.
- [21] F. Ciampa , P. Mahmoodi, F. Pinto, M. Meo, *Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components*, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, UK, 2018
- [22] Termogram motora automobila, preuzeto: <https://www.infratec.eu/thermography/industries-applications/automotive-industry/>
Pristup ostvaren: 1.9.2019.
- [23] C. Srajbr, G. Tanasie, K. Dilger, S. Böhm : *Active thermography for quality assurance of joints in automobile manufacturing*, University of Braunschweig, Germany, 2011
- [24] Termogram okvira automobila, preuzeto: <https://www.thesnellgroup.com/blog/infrared-automotive-industry>
Pristup ostvaren: 4.9.2019.
- [25] H. Glavaš, M. Hadzima-Nyarko, I. Haničar Buljan, T. Berić, *Locating Hidden Elements in Walls of Cultural Heritage Buildings by Using Infrared Thermography*, 2019.
- [26] Fluke RSE300, preuzeto: <https://www.fluke.com/en>
Pristup ostvaren: 1.9.2019
- [27] INFRA TEC ImageIR 10300, preuzeto: <https://www.infratec.eu/>
Pristup ostvaren: 1.9.2019

SAŽETAK

Ovaj završni rad opisuje infracrvenu termografiju gdje su objašnjeni osnovni pojmovi vezani za elektromagnetizam: zračenje, valovi, toplina, emisivnost kao i njihovi zakoni. Također pojašnjen je postupak rada aktivne, ali i pasivne termografije zajedno s utjecajima elektromagnetskog zračenja na materijale i njihova svojstva. Najvažniji dio koji predstavlja primjenu aktivne termografije, govori o velikom rasponu koristi u mnogim industrijama od zrakoplovne, svemirske, automobilske do elektrotehničke i industrije medicine. Dani su primjeri primjene u svakoj od pojedinih industrija. Pokazane su IC kamere i njihove karakteristike, koje se koriste u infracrvenoj termografiji za izradu termograma. Na kraju, provedena je praktična provedba infracrvene termografske analize dijela unutrašnjeg zida zgrade, a njeni rezultati prikazani su u završnom dijelu rada.

Ključne riječi: elektromagnetizam, infracrvena termografija, primjena aktivne termografije, IC kamere

ABSTRACT

This paper describes the work of infrared thermography, where basic concepts related to electromagnetism are explained: radiation, waves, heat, emissivity and their laws. Also, the procedure of active and passive thermography is explained together with the effects of electromagnetic radiation on materials and their properties. The most important part, which represents the application of active thermography, talks about wide range of uses in many industries from aerospace, electrical, automotive and medical industries. Examples of application in each of the individual industries are given. The IC cameras and their characteristics used in infrared thermography for thermogram making are shown as well. Finally, the practical implementation of infrared thermographic analysis of part of the inner wall of the building is done and its results are shown in the final part of the paper.

Keywords: electromagnetism, infrared thermography, application of active thermography, IC cameras

ŽIVOTOPIS

Filip Franić, rođen je 1997. godine u Požegi. Završava osnovnu školu „Julija Kempf“ zajedno s osnovnom glazbenom školom u Požegi. Nastavlja školovanje u Gimnaziji Požega, smjer matematički. Nakon završene srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer računarstvo i trenutno je student treće godine preddiplomskog studija.